453

# THÈSE

POUR

# LE DOCTORAT EN MÉDECINE

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNÉE 1921 — N° —

# THÈSE

POUR

# LE DOCTORAT EN MÉDECINE

PAR

**P. CHAILLEY-BERT**

Né à Paris le 3 mai 1890

# ÉTUDE

SUR LA

# PHYSIOLOGIE DE LA MARCHE

Travail des Laboratoires de Physiologie appliquée à l'Education Physique, de la Faculté de Médecine de Paris et de la Chaire d'Organisation du Travail Humain, du Conservatoire des Arts et Métiers.

*Président :* M. ROGER, *professeur*,
Doyen de la Faculté de Médecine de Paris

PARIS

IMPRIMERIE DU PALAIS

20, RUE GEOFFROY-L'ASNIER, 20

1921

# FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

## LE DOYEN : M. ROGER

## PROFESSEURS

| | |
|---|---|
| Anatomie | NICOLAS. |
| Anatomie médico-chirurgicale | CUNÉO. |
| Physiologie | Ch. RICHET. |
| Physique médicale | André BROCA. |
| Chimie organique et chimie générale | DESGREZ. |
| Bactériologie | BEZANÇON. |
| Parasitologie et histoire naturelle médicale | BRUMPT. |
| Pathologie et thérapeutique générales | Marcel LABBÉ. |
| Pathologie médicale | RENOIS. |
| Pathologie chirurgicale | LECÈNE. |
| Anatomie pathologique | LETULLE. |
| Histologie | PRENANT. |
| Pharmacologie et matière médicale | POUCHET. |
| Thérapeutique | CARNOT. |
| Hygiène | BERNARD. |
| Médecine légale | BALTHAZARD. |
| Histoire de la médecine et de la chirurgie | MÉNÉTRIER. |
| Pathologie expérimentale et comparée | ROGER. |
| Clinique médicale | CHAUFFARD.<br>ACHARD.<br>WIDAL.<br>GILBERT. |
| Hygiène et clinique de la première enfance | MARFAN. |
| Clinique des maladies des enfants | N... |
| Clinique des maladies mentales et des maladies de l'encéphale | DUPRÉ. |
| Clinique des maladies cutanées et syphilitiques | JEANSELME. |
| Clinique des maladies du système nerveux | P. MARIE. |
| Clinique des maladies contagieuses | TEISSIER. |
| Clinique chirurgicale | DELBET.<br>LEJARS.<br>HARTMANN.<br>GOSSET. |
| Clinique ophtalmologique | De LAPERSONNE |
| Clinique des maladies des voies urinaires | LEGUEU. |
| Clinique d'accouchements | BAR.<br>COUVELAIRE.<br>BRINDEAU. |
| Clinique gynécologique | J.-L. FAURE. |
| Clinique chirurgicale infantile | BROCA Auguste |
| Clinique thérapeutique | VAQUEZ. |
| Clinique oto-rhino-laringologique | SEBILEAU. |
| Clinique thérapeutique chirurgicale | DUVAL. |

## AGRÉGÉS EN EXERCICE

| MM. | MM. | MM. | MM. |
|---|---|---|---|
| ABRAMI | DUVOIR | LARDENNOIS | RATHERY |
| ALGLAVE | FIESSINGER | LE LORIER | RETTERER |
| BASSET | GARNIER | LEMIERRE | RIBIERRE |
| BAUDOUIN | GOUGEROT | LEQUEUX | RICHAUD |
| BLANCHETIÈRE | GRÉGOIRE | LEREBOULLET | ROUSSY |
| BRANCA | GUÉNIOT | LERI | ROUVIÈRE |
| CAMUS | GUILLAIN | LÉVY-SOLAL | SCHWARTZ |
| CHAMPY | GUILLEMINOT | MATHIEU | TANON |
| CHEVASSU | HEITZ-BOYER | METZGER | TERRIEN |
| CHIRAY | JOYEUX | MOCQUOT | TIFFENEAU |
| CLERC | LABBÉ (Henri) | MULON | VILLARET |
| DEBRÉ | LAIGNEL-LAVASTINE | OKINCZYC. | |
| DESMAREST | LANGLOIS | PHILIBERT | |

*Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'Ecole a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.*

A MON PRÉSIDENT DE THÈSE

M. le Professeur ROGER,

Officier de la Légion d'honneur
Membre de l'Académie de Médecine
Doyen de la Faculté de Médecine

*En le remerciant de l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider cette thèse.*

A mon Maître le Professeur J.-P. LANGLOIS,

*En témoignage de profond attachement et de reconnaissance pour les conseils, l'aide et l'amitié qu'il n'a cessé de me prodiguer.*

A mon Maître le Professeur H. HARTMANN.

# ÉTUDE

SUR LA

# PHYSIOLOGIE DE LA MARCHE

## I

### HISTORIQUE

On désigne sous le nom de marche la série des mouvements des membres inférieurs qui permettent à l'homme de se déplacer, tout en conservant la station verticale.

De tous les mouvements que l'homme accomplit, la marche est un des plus ordinaires, comme un des plus importants, au point que beaucoup ont admis qu'il est un mouvement aussi instinctif que le mouvement du bras qui protège la face contre un coup.

Même ceux que l'on appelle des sédentaires, dit Bénédict, font chaque jour une marche appréciable. Il est extrêmement rare de rencontrer quelqu'un qui fasse moins de 2 ou 3 kilomètres dans sa journée.

Il a calculé qu'un de ses collaborateurs accomplissait chaque jour sans sortir de son laboratoire une marche de 9 kilomètres 1/2 ; il habitait à 400 mètres de là, ce qui, à le supposer faisant ce trajet deux fois à l'aller et deux fois au retour, constituait encore une marche, en plus, de 1.600 mètres par jour ; le total de sa marche était ainsi de 11 kilomètres quotidiens. Et ce n'est pas l'expérience d'un jour, mais une moyenne de plusieurs mois d'observation.

*

L'enfant ne marche pas, dès sa naissance ; mais il paraît bien établi qu'aussitôt que son système locomoteur a acquis le développement suffisant, il est susceptible de marcher spontanément. Les observations de Woodworth (1), de Kirkpatrick (2) et de Trettien (3) établissent qu'on a vu des enfants, qui jamais ne s'étaient même tenus debout, se mettre à marcher sous l'influence d'une émotion quelconque : peur, plaisir, etc...

Dans le langage courant, « marcher » veut dire se déplacer par ses moyens naturels, et n'implique aucune allure spéciale ; il n'en est pas de même pour le physiologiste qui donne à ce terme une acception tout à fait particulière, l'opposant à la course, au pas gymnastique, au saut, etc...

Marey définit ainsi la marche : « Un mode de progression dans lequel l'un des pieds vient s'appuyer sur le sol avant que l'autre l'ait quitté. » Et ceci surtout le distingue de la course dans laquelle « l'un des pieds vient s'appuyer sur le sol quand l'autre l'a déjà quitté ». Double appui d'une part et suspension d'autre part constituent la grande différence de ces deux modes de locomotion.

Cette distinction sur laquelle Marey et ceux de son école ont tant insisté a un peu perdu de son importance depuis que les méthodes d'études ont été changées, depuis le jour où la chimie a remplacé la mécanique. Nous la conservons cependant, parce qu'elle correspond à deux modes de locomotion bien différents, encore que souvent difficiles à séparer.

---

(1) Woodworth : *Le mouvement.*

(2) Kirkpatrick : *Psychological Review* 1899, VI p. 275.

(3) Trettien : *Amer. Journ. of Physoi.* 1900. IX. I.

Les études sur la physiologie de la marche appartiennent à deux groupes bien distincts :

L'école de Marey et de ses prédécesseurs, qui se sont appuyés sur des données théoriques, visant l'élévation du corps à chaque pas ;

L'école moderne, qui a cherché à étudier les variations d'énergétique en s'appuyant sur les échanges respiratoires durant la marche.

Les premiers travaux sur la marche datent vraisemblablement du XVII[e] siècle. Vers 1650, un médecin italien, de l'école iatromécanicienne, Borelli, écrit, après Fabricius d'Acquapendente, un livre publié à Rome en 1680, un an après sa mort, et intitulé *De Motu Animalium*. L'observation directe était sa seule méthode d'étude, et bien que la marche ait été plus complètement décrite depuis, il en avait vu les temps essentiels : projection du centre de gravité, impulsion du membre postérieur, pendant que l'antérieur, solidement appuyé sur le sol, supporte le corps porté en avant.

Cent cinquante ans plus tard, au début du XIX[e] siècle, Gerdy découvre les déplacements latéraux du corps, supporté alternativement par chaque jambe, et les mouvements des membres supérieurs, synchrones à ceux des membres inférieurs, mais de sens opposé, et les compare au trot du cheval.

Enfin, en 1836, paraît le livre des frères Weber qui, pour la première fois, étudient scientifiquement la marche. Leur instrumentation est bien restreinte : une piste horizontale, quelques mires, une montre à secondes, constituent tout leur matériel ; ils observent l'élévation du tronc pendant la marche et calculent qu'elle est de

32 mm. environ, mais croient qu'elle ne varie pas, quelle que soit la vitesse de la marche.

Malgré toute cette suite d'expérimentateurs, l'étude du mouvement était presque encore inexistante.

Toutes les connaissances mécaniques que nous en avons aujourd'hui découlent des travaux de Marey et de son école ; il fit de cette étude une science exacte, basée sur des méthodes précises, apportant dans cette étude toute la variété de son génie inventif, créant de toutes pièces méthodes, techniques, instrumentation, inventant la méthode graphique, la chronophotographie, le cinématographe.

Il commença par étudier la marche du point de vue mathématique, appliquant à un animal qui se déplace les lois qui régissent un corps quelconque en mouvement, ou plus exactement un corps qui reçoit l'application d'une force.

Ensuite, grâce à l'emploi simultané de la méthode graphique et de la chronophotographie, il décomposa la marche, isolant les uns des autres les différents gestes et les diverses attitudes dont la suite constitue un pas. Il put de la sorte se rendre compte du travail que l'homme a à accomplir pour marcher ; un point cependant lui échappa complètement, il ne soupçonna pas le rôle des muscles antagonistes, qui fut après lui étudié particulièrement bien par Winslow, Duchenne de Boulogne, Demeny, Beaunis et Athanasiu.

Le travail dans la marche se répartit de trois façons différentes :

1° — T. 1. — Travail selon la verticale, travail nécessaire pour soulever le corps. Pour un homme de 75 kilogs il serait de 6,2 kilogrammètres environ ; plus la vitesse

augmente et plus il diminue, car à mesure que l'allure s'accélère les oscillations verticales diminuent.

2° — T. 2. — Travail suivant l'horizontale.

3° — T. 3. — Travail de translation du membre inférieur. Pour un homme de 75 kilos, marchant à 40 pas à la minute, le travail total serait :

T. 1 = 6,2 Kgms.
T. 2 = 2,5 Kgms.
T. 3 = 0,3 Kgms.

Travail total : 6,2 + 2,5 + 0,3 = 9 kgms.

De 9 kgms, le travail total passe à :

12 Kgms à la cadence de 60 pas par minute.
14,5 » » 80 »
17 » » 90 »

Pendant la course T. 1 diminue, mais T. 2 et T. 3 augmentent, et le travail total est considérablement accru.

Il est de :

15,5 kgms à la cadence de 90 pas par minute.
14,8 » » 105 »
20 » » 135 »
24 » » 145 »

Ces chiffres ne sont pas rigoureusement exacts, car, en plus des mouvements horizontaux et verticaux, le centre de gravité décrit des courbes extrêmement complexes, qui s'infléchissent tour à tour dans les trois directions de l'espace, mais Marey a jugé que le travail employé à ces mouvements était trop faible pour modifier en quoi que ce soit le chiffre du travail total et délibérément il l'a négligé.

Si l'on veut étudier directement la dépense d'énergie

effectuée pendant la marche, il est clair qu'on se heurtera à de grosses difficultés. Le départ entre l'énergie employée à la marche et l'énergie employée au maintien de la vie est loin d'être simple, et on a vite reconnu qu'il était impossible d'avoir une idée des dépenses effectuées pendant le mouvement en connaissant simplement la valeur en calories des aliments absorbés.

Des physiologistes français, Hirn, puis Chauveau, ont pensé qu'on pourrait mesurer l'énergie employée en faisant marcher un sujet à l'intérieur d'un calorimètre ; ils se servirent non d'un tapis mobile, mais d'une roue. La plus grande partie du travail était employée à élever le corps. Il est donc difficile d'en déduire quelle était l'énergie employée pour la seule progression horizontale.

Plus tard, à la suite des travaux de Smith, de Gruber, de Katzenstein, de Sonden et Tiegerstedt et de Zuntz, on tenta de déterminer le travail effectué, en étudiant les échanges respiratoires, c'est-à-dire l'acide carbonique ($CO^2$) produit et l'oxygène utilisé, et ainsi à calculer indirectement l'énergie employée.

C'est à cette méthode que se sont ralliés tous les physiologistes, et l'on peut dire que, depuis vingt ans, toutes les recherches sur le mouvement ont été effectuées par la détermination des échanges respiratoires, le sujet d'abord au repos, couché, assis ou debout, ensuite le sujet travaillant, et en notant l'augmentation dans la production de $CO^2$, et l'utilisation de l'oxygène durant le travail.

D'une part, on connaît la quantité de calories que donne la combustion d'un gramme de graisse, d'albuminoïdes et d'hydrate de carbone. D'autre part, on sait

que dans cette combustion, lorsqu'un litre d'oxygène est utilisé, il est produit de 4,600 à 5,047 calories.

On peut également connaître la quantité de calories produites dans l'organisme en dosant $CO^2$ produit. Les chiffres sont un peu plus forts que pour l'oxygène. Un litre de $CO^2$ produit de 5,047 à 6,629 calories.

| NATURE DE L'ALIMENT | CHALEUR QUE DÉGAGE dans l'organisme la combustion de 1 gr. de l'aliment | CHALEUR PRODUITE par litre d'oxygène consommé | CHALEUR PRODUITE par litre de $CO^2$ exhalé |
|---|---|---|---|
| Graisse..... | 8,8 | 4,686 | 6,629 |
| Hydrate de carbone..... | 4,0 | 5,047 | 5,047 |
| Albuminoïdes..... | 3,8 | 4,600 | 5,683 |

Dans la pratique, les chiffres moyens généralement adoptés sont 4 calories 83 pour un litre d'oxygène absorbé et 5 calories 4 pour un litre de $CO^2$ exhalé.

Le quotient respiratoire, c'est-à-dire :

$$\frac{CO^2}{\text{oxygène consommé}}$$

que l'on écrit plus simplement : $\frac{CO^2}{O^2}$, le quotient respiratoire varie naturellement suivant que l'on brûle de la graisse ou des hydrates de carbone ; dans le premier cas, il est de 0,7 ; dans le second, il atteint 1. Hanriot et Richet l'ont même vu parfois dépasser l'unité au cours d'un travail musculaire considérable accompagné d'une alimentation riche en hydrates de carbone. On doit penser que, dans ce cas, l'organisme utilise, outre l'oxygène atmosphérique, de l'oxygène en réserve dans le tissu musculaire.

Le premier essai de détermination du travail par l'examen des échanges respiratoires fut fait par l'An-

glais Edward Smith, qui présenta, en 1859, à la Société Royale de Londres, un mémoire concernant deux expériences sur la marche. Il ne s'occupa que du $CO^2$, et trouva que son sujet dépensait par minute :

Au repos ..... 482 grammes de $CO^2$
A l'allure de 3 km. 2 à l'heure 1.173 grammes
A l'allure de 4 km. 8 à l'heure 1.674 grammes »

Ces chiffres ont été critiqués par Grubert et Voit, qui, tous les deux, les considèrent comme trop élevés.

En 1891, Gruber, de Berne, entreprit une série d'expériences sur la marche en terrain horizontal et en montée. Prenant comme unité la production de $CO^2$ au repos, il trouve :

| | Repos | Marche | Marche (non entraîné) | Marche (entraîné) |
|---|---|---|---|---|
| Série I : | 1 | 2,00 | 4,1 | 3,3 |
| Série II : | 1 | 1,75 | 3,05 | 2,42 |

et il déduit de ces chiffres que la production de $CO^2$ d'un homme qui travaille n'est pas en fonction du travail, car elle décroît avec l'entrainement.

Smith et Gruber n'avaient considéré que la production de $CO^2$. Pour la première fois, Katzenstein, dans ses expériences faites au laboratoire de Zuntz, à Berlin, va s'occuper et de la production de $CO^2$, et de la consommation d'oxygène. Il conclut que la consommation d'oxygène par unité de travail est plus grande pour un travail faible que pour un travail considérable. Quant au quotient respiratoire, il ne bouge absolument pas durant le travail.

Les principales recherches sur les échanges respiratoires, au cours de la marche, furent faites par Zuntz, de Berlin, qui travailla cette question dès 1896, avec Schumburg, puis avec Durig, de Vienne, en compagnie

desquels il publia de nombreuses observations, de 1896 à 1906, et qui inspira, avec Dürig et Tigerstedt, de Helsingfors, le grand travail de Benedict, de Washington, sur la marche.

Zuntz fit ses expériences dans des conditions très différentes ; s'il travailla surtout dans son laboratoire de Berlin, il fit aussi de nombreuses expériences dans les Alpes, aux environs de Zermatt et au col d'Olen. En plein air, le sujet porte sur son dos un spiromètre du poids de 7 kilos et il respire dans une soupape de Zuntz, le nez fermé par une pince. Zuntz se plaint beaucoup de cette instrumentation ; quand le travail est un peu intense, l'usage de la soupape devient pénible, et la pince nasale est difficilement supportée ; aussi Zuntz et ses élèves s'entraînent-ils à respirer par le nez et à expirer par la bouche. Le port du spiromètre lui semble également fort incommode, et dans son laboratoire, il emploie un spiromètre fixe. Il y fait également installer son tapis mobile, sur lequel il fera la plupart de ses expériences. Il paraît attacher beaucoup d'importance à déterminer ce qu'il appelle le métabolisme basal, c'est-à-dire la valeur des échanges respiratoires au repos, valeur qu'il est important de bien connaître, puisque, selon lui, le prix de revient du travail est donné par la différence entre ce métabolisme basal et le métabolisme au cours de l'exercice. Ce métabolisme basal, il le détermine au début en prenant les échanges le sujet étant assis, mais cela lui paraît encore insuffisant, et au cours des expériences de 1904 faites à Vienne, en compagnie de Dürig, les échanges sont déterminés chaque matin sur le sujet encore couché.

Cette question du métabolisme basal est aujourd'hui

fort discutée. La théorie de Zuntz est très attaquée : selon lui, le métabolisme basal était invariable, quel que fût le travail ; on a tendance à admettre maintenant que le métabolisme général change sous l'influence du travail, que nous ne fonctionnons pas de la même façon au repos et en mouvement, en d'autres termes que notre organisme ne travaille pas toujours sous la même économie.

On peut dire cependant que l'augmentation du métabolisme général, que les dépenses supplémentaires de notre organisme sous l'influence d'un travail doivent être comprises dans le prix de revient de ce travail. Les dépenses occasionnées par une marche doivent comprendre, non seulement les mouvements qui nous servent en propre à marcher, mais toutes les dépenses supplémentaires que l'organisme effectue à cette occasion.

Zuntz se préoccupe beaucoup également de l'influence des repas sur les échanges respiratoires, et, en vue d'obtenir des résultats plus constants, toutes ses dernières expériences ont lieu sur des sujets à jeun.

Enfin, dès 1899, il étudie l'influence de la vitesse sur le métabolisme respiratoire, et bien qu'il soit gêné par une irrégularité de marche de son tapis mobile, il peut faire plusieurs expériences à des vitesses variant de 53 à 145 mètres par minute.

A la suite des premières expériences de Zuntz, les travaux sur la marche se multiplient ; il faut citer ceux de Caspari, qui eut la bonne fortune, en 1905, de pouvoir étudier deux marcheurs (dont l'un était végétarien), qui firent à pied le voyage de Dresde à Berlin. Il continua à travailler la question avec Zuntz en 1906 et avec Dürig en 1909.

Les études de Dürig, de Vienne, sur la marche, sont universellement connues et appréciées. Elles ont été conduites avec un soin que Benedict qualifie d'extraordinaire. Il fit ses expériences, d'une part, à Vienne, dans son laboratoire, où il disposait d'une piste horizontale de 200 mètres de long ; d'autre part, dans les Alpes, où, au cours de l'été 1906, il fit une quantité d'observations, se prenant lui-même comme sujet, prenant même sa femme, qui n'hésita pas à se charger de plus de 16 kilos d'instruments alors qu'elle ne pesait elle-même que 45 kilos. En ce qui concerne le métabolisme basal, Dürig croit qu'il n'a de valeur que si on le prend sur le sujet couché ; les chiffres obtenus le sujet étant debout, n'ont, à ses yeux, aucune valeur. C'est dans le laboratoire de Dürig que Brézina et Kolmer refirent, en 1912, puis en 1914, deux séries d'expériences sur la marche ; ils s'attachèrent tout particulièrement à la détermination du métabolisme basal ; leurs sujets ne travaillaient que douze heures après un repas, pour éviter l'influence de la digestion, et prenaient seulement une tasse de thé sucré avant le travail. Les auteurs donnent comme valeur du métabolisme basal 1.083 petites calories par minute, soit 1.460 grandes calories par jour.

Enfin nous devons citer les expériences de Douglas, Haldane, Henderson et Schneider, à Oxford, en 1913, et celles de Galeoti, Barkan, Guiliani, Higgins, Signorelli et Vialé, faites au mont Rose (col d'Olen), en 1914.

Benedict, à qui nous faisons de nombreux emprunts et dont nous analysons plus loin le livre sur *Les Transformations de l'énergie pendant la marche horizontale*, Benedict a ramené les chiffres donnés par tous ceux qui ont étudié la marche en « grammes-calories par kilo-

grammètre horizontal ». Il entend par là la quantité de calories nécessaires pour déplacer un kgm. de 1 mètre. Il les a réunis en un tableau très complet, dont nous donnons plus loin un résumé.

On peut voir que la vitesse est un facteur d'une importance considérable : les chiffres donnés par les différents auteurs passent de 0,324 pour 32 mètres à la minute (Sonden et Tiegerstedt 1895), à 1,169 pour 117 mètres par minute (Caspari 1905), et bien que les exceptions soient nombreuses, en général, les chiffres les plus élevés correspondent aux plus grandes vitesses.

Pour l'allure de 80 à 90 mètres par minute (4, 8 km. à 5,4 km. à l'heure), la valeur du kgm horizontal varie

TABLEAU N° 1

| NOM DES AUTEURS | Vitesse en mètres par minute | GRAMME CALORIE par kilogrammètre horizontal | NOM DES AUTEURS | Vitesse en mètres par minute | GRAMME CALORIE par kilogrammètre horizontal | NOM DES AUTEURS | Vitesse en mètres par minute | GRAMME CALORIE par kilogrammètre horizontal |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Smith 1859 | 53 | 0,407 | Zuntz 1901 | 75 | 0,518 | | 62 | 0,534 |
| | 80 | 0,468 | | 100 | 0,527 | | 88 | 0,574 |
| Gruber 1891 | 54 | 0,358 | Dürig et Zuntz 1904 | 85 | 0,584 | | 111 | 0,743 |
| | 74 | 0,526 | | 80 | 0,663 | | 125 | 0,845 |
| Katzenstein 1891 | 62 | 0,786 | | 84 | 0,608 | Brezina et Kolmer 1912 | 140 | 0,971 |
| | 63 | 0,554 | | 62 | 0,774 | | 53 | 0,489 |
| | 65 | 0,426 | | 139 | 0,979 | | 81 | 0,520 |
| | 60 | 0,506 | Caspari 1905 | 177 | 1,169 | | 93 | 0,616 |
| Sonden et | 50 | 0,337 | | 131 | 1,972 | | 105 | 0,711 |
| Tiegerstedt 1895 | 65 | 0,465 | | 60 | 0,636 | | 118 | 0,928 |
| | 32 | 0,324 | Zuntz, Loewy et Caspari 1906 | 43 | 0,845 | | 127 | 0,967 |
| Zuntz et | 50 | 0,700 | | 81 | 0,613 | | 53 | 0,402 |
| Schumburg 1896 | 42 | 0,616 | | 70 | 0,643 | | 81 | 0,660 |
| | 62 | 0,670 | | 65 | 0,604 | | 120 | 0,650 |
| | 60 | 0,535 | Dürig 1906 | 71 | 0,668 | | 136 | 0,898 |
| Loewy et | 56 | 0,570 | | 95 | 0,641 | Douglas, Haldane, Hendersac et Schneider 1913 | 53 | 0,562 |
| Zuntz 1897 | 67 | 0,681 | Dürig et Caspari 1909 | 90 | 0,539 | | 79 | 0,600 |
| | 60 | 0,821 | | 116 | 0,628 | | 108 | 0,789 |
| | 65 | 0,616 | | 126 | 0,735 | | 114 | 0,833 |
| | 56 | 0,554 | | 141 | 0,854 | | 132 | 0,942 |
| Zuntz 1899 | 98 | 0,653 | Dürig, Kolmer et Caspari 1909 | 152 | 1,023 | | 136 | 1,066 |
| | 140 | 1,072 | | 102 | 0,573 | | 46 | 0,530 |
| | 67 | 0,527 | | 107 | 0,629 | | 53 | 0,500 |
| Frentzel et | 36 | 0,560 | | 49 | 0,542 | Brezina et Kolmer 1914 | 51 | 0,500 |
| Reach 1901 | 64 | 0,553 | | 66 | 0,562 | | 30 | 0,510 |
| | 34 | 0,558 | | 102 | 0,648 | | 86 | 0,448 |

de 0,3 à 0,7 petite calorie. La moyenne des expériences donne 0,55. C'est également à ce chiffre que s'est arrêté Dürig dans son admirable Revue des travaux sur le mouvement.

Avant de donner les chiffres trouvés par Benedict au cours des expériences sur la marche en terrain horizontal, nous voudrions donner une brève description des appareils qu'il emploie :

Il renonce absolument à faire marcher son sujet sur une piste, portant des instruments lourds et encombrants. Il utilise un tapis roulant et son sujet respire dans un appareil installé à demeure dans le laboratoire.

Ce tapis roulant est constitué par une courroie sans fin, en cuir, de 4,35 m. de long, qui tourne sur deux poulies de bois de 41 cm. de diamètre. Sur toute la partie où l'on marche, le tapis est supporté par des tubes d'acier montés sur billes, destinés à diminuer autant que possible les frottements sur la surface de roulement du tapis. Un moteur électrique de 1/2 HP l'entraîne à une vitesse qui peut varier de 50 à 150 mètres à la minute, soit de 3 à 9 kilomètres à l'heure. Le tout est monté sur un solide cadre de bois, calé horizontalement avec le plus grand soin.

L'appareil que Benedict emploie pour mesurer les échanges respiratoires est l'appareil de Regnault et Reiset, modifié par Regnard et Jolyet. Le sujet respire au moyen d'une soupape dans un circuit fermé, où un ventilateur fait continuellement circuler l'air. Le $CO^2$ est absorbé par de la potasse et il suffit de peser les flacons barbotteurs avant et après l'expérience pour connaître le poids total de $CO^2$ exhalé. Quant à l'oxygène,

il en est introduit une quantité connue durant l'expérience. Autour de cet ensemble, sont installés d'autres instruments pour mesurer le rythme respiratoire, le nombre de pas et la hauteur dont le corps se soulève à chaque pas. Les chiffres trouvés par Benedict sont de 25 à 50 millimètres suivant la taille du sujet ; il a cherché à inscrire le pouls, mais il ne semble pas qu'il ait trouvé un procédé satisfaisant.

En ce qui concerne le métabolisme basal, Benedict s'est décidé à prendre les échanges respiratoires de son sujet debout ; il se sépare donc sur ce point de Zuntz et de son école qui tiennent à faire leurs mesures sur des individus couchés et à jeun depuis la veille ; Benedict va même jusqu'à dire qu'il serait possible de déterminer le métabolisme basal en opérant sur un sujet marchant lentement ; il fit cependant un certain nombre de mesures sur le même sujet, couché et debout, mais il semble que les différences trouvées soient faibles :

SUJET N° 1

Couché ..... 1,23 petite calorie par minute.
Debout ..... 1,34 » » »

Pour son sujet n° 2, il prendra le chiffre de 1,43, moyenne d'un grand nombre de déterminations, chaque fois que le métabolisme basal n'a pu être calculé.

Par contre, il porte une grande attention à l'influence de la nourriture. La moyenne de douze expériences donne les chiffres suivants : le sujet étant au repos, assis :

Sans nourriture ..... 1,39 petite calorie par minute.
Après repas léger ... 1,33 » » »
Après repas important 1,46 » » »

## TABLEAU N° 2

| VITESSE EN MÈTRES par minute | CHALEUR DÉVELOPPÉE en plus du métabolisme basal | | VITESSE EN MÈTRES par minute | CHALEUR DÉVELOPPÉE en plus du métabolisme basal | |
|---|---|---|---|---|---|
| | en grandes calories par minute | en petite calorie par kilogrammètre horizontal | | en grandes calories par minute | en petite calorie par kilogrammètre horizontal |
| **Sujet n° 1 (moyennes)** | | | | | |
| *avec nourriture* | | | *sans nourriture* | | |
| 77,7 | 2,98 | 0,533 | 76 | 2,81 | 0,507 |
| **Sujet n° 2** *(sans nourriture)* | | | | | |
| 60,6 | 2,49 | 0,571 | 102 | 4,17 | 0,570 |
| 60,8 | 1,88 | 0,439 | 102,6 | 4,08 | 0,555 |
| 76,1 | 3,20 | 0,584 | 139,6 | 9,13 | 0,912 |
| 76,4 | 2,54 | 0,472 | 140,7 | 8,98 | 0,890 |
| 80,0 | 2,81 | 0,498 | 246,7 | 8,32 | 0,788 |
| 80,2 | 2,79 | 0,487 | 146,8 | 10,43 | 0,983 |
| 91,9 | 3,42 | 9,520 | 148,4 | 8,42 | 0,799 |
| 93,3 | 3,47 | 0,520 | 148,7 | 8,81 | 0,823 |

## II

## TECHNIQUE DES EXPERIENCES

Cette étude sur la marche a été entreprise à la Faculté de Médecine, au Laboratoire de Physiologie appliquée à l'Education physique, avec la collaboration du personnel du Laboratoire d'Organisation technique du Travail humain, du Conservatoire national des Arts et Métiers. Ces deux laboratoires sont sous la direction du Professeur Langlois.

Tous ceux qui, au début, étudièrent la marche, se sont toujours plaints des difficultés que causait la mesure des échanges respiratoires. Ou bien le sujet était obligé de porter un appareillage encombrant et lourd (le premier spiromètre de Zuntz pesait 7 kgs), ou bien un aide accompagnait le sujet en portant les appareils. Zuntz s'est vite rendu compte de la presque impossibilité qu'il y avait à faire des expériences précises dans ces conditions. C'est alors qu'il conçut l'idée de son tapis mobile, qui permettait de faire marcher son sujet sur place et d'avoir tous ses appareils installés à poste fixe. Sous son inspiration, Benedict installa le tapis roulant que nous avons déjà décrit.

Le professeur Langlois, sur les fonds attribués par le

Ministère de la Guerre au cours de physiologie appliquée à l'Education physique, a fait installer dans son laboratoire un appareil du même genre, mais singulièrement agrandi et perfectionné, à pente et vitesse variables ; la vitesse varie de 50 à 400 mètres à la minute, soit 3 à 24 kilomètres à l'heure, et la pente peut aller de 0 à 35 centimètres par mètre. En outre, la marche du moteur étant réversible, il est possible d'étudier avec cet appareil le travail durant la montée et durant la descente.

Nous croyons bon de faire ici, une description assez détaillée de cet appareil. Il a été construit par M. Linké, sous la direction de M. Hallé, ingénieur des Magasins du Louvre, et nous ne saurions trop louer la façon dont ils l'ont conçu et exécuté.

Il consiste essentiellement en un tapis de cuir sans fin, entraîné par un moteur, selon le système des tapis roulants des grands magasins, avec toutefois la différence que ce tapis glisse en sens contraire de la marche, ayant pour but non d'aider la progression de ceux qui l'utilisent, mais bien de maintenir en place un sujet qui marche.

La longueur totale du tapis est de 8 mètres et sa largeur de 60 centimètres ; il est tendu entre deux poulies de bois de 52 centimètres de diamètre, l'une fixe, l'autre folle, distante de 3 m. 18 d'axe en axe ; sa longueur utilisable est de 2 m. 80 environ, ce qui permet d'y faire marcher aisément deux hommes portant un brancard. La tension du tapis est réglable au moyen de deux vis qui agissent sur la poulie folle pour l'écarter ou la rapprocher de l'autre. Entre les deux poulies, le tapis glisse sur un plancher de chêne soigneusement poli et talqué qui remplace les rouleaux en tubes d'acier de l'appareil

de Benedict. La poulie fixe est calée sur un arbre qu'entraîne le moteur par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse. Le tout est naturellement solidement encastré dans un bâti métallique en fer à T entretoisé.

L'inclinaison variable de tout l'ensemble constitue un important perfectionnement. L'arbre sur lequel est calée la poulie fixe dépasse le bâti et est monté sur deux paliers scellés dans le sol ; c'est autour de cet arbre qu'oscillera tout l'appareil quand on élèvera l'autre extrémité. Le système élévatoire est simple : deux fortes chaînes sont boulonnées sur l'extrémité du bâti et passent sur les pignons d'un treuil scellé dans le mur trois mètres plus haut. Au bout de chaque chaîne pend un contrepoids de 80 kilos, qui contre-balance en partie le poids de l'appareil soulevé. L'extrémité mobile du bâti porte un gros ergot qui glisse dans un fer en U servant de guide. L'appareil, même levé, conserve donc une stabilité parfaite.

L'inclinaison maxima peut atteindre 35 centimètres par mètre, l'adhérence du pied sur le tapis est à ce moment à peine suffisante pour maintenir le sujet. Le mouvement est donné par un moteur électrique de 5 HP. Et là de grosses difficultés techniques furent à vaincre. La Faculté de Médecine ne dispose pas de courant électrique continu, elle n'a que du courant monophasé de 42 périodes sous 110 volts de tension. Dans ces conditions, il est très difficile de modifier considérablement la vitesse d'un moteur. Le constructeur, M. Linké, a dû recourir, pour obtenir les variations de vitesse nécessaires, au décalage des balais. Ce dispositif présente un grave inconvénient : on est obligé de partir en grande vitesse et de ralentir peu à peu jusqu'à la vitesse voulue.

Deux petites banquettes fixées sur le bâti à droite et à gauche du tapis, permettent au sujet de ne commen-

cer à marcher qu'au moment où la vitesse convenable est atteinte. Enfin un dispositif de sécurité permet d'arrêter instantanément l'appareil en tirant en arrière la rampe droite qui agit sur un disjoncteur.

***

Pour déterminer les dépenses énergétiques d'un homme durant la marche, pour calculer, selon l'expression de Waller, le prix de revient du travail, il est indispensable de connaître à tout moment les dépenses du sujet.

Lorsque Regnard voulut faire des expériences de ce genre sur le cobaye, il enferma son animal dans un vase hermétiquement clos, où il laissait entrer une quantité d'air connue, soigneusement recueillie ensuite à la sortie. C'est, évidemment, la méthode idéale, on connaît ainsi la valeur non seulement des échanges respiratoires, mais celle de tous les excreta.

Pareil procédé est difficilement applicable à l'homme ; Hirn, en 1858, Chauveau, en 1899, ont essayé de faire travailler un homme dans un calorimètre ; les travaux de Sonden et Tigerstedt, en 1895, ont été faits dans la grande chambre hermétique de Stockholm, dont la capacité dépasse 100 mètres cubes. En 1905, Atwater construisit le calorimètre où il fit ses expériences classiques. Enfin Benedict se promet de faire transporter son *treadmill* dans le calorimètre qu'il est en train d'achever et qui est construit sur le modèle du calorimètre d'Atwater. Le prix de construction d'un calorimètre, les difficultés de toutes sortes que cause son fonctionnement, font que malgré tout leur intérêt, les expériences d'Atwater et de ses prédécesseurs ne peuvent être que des exceptions.

Lorsqu'on veut connaître les échanges respiratoires de l'homme pendant la marche, on se sert, en général d'une soupape du genre de la soupape de Zuntz ou de la sou-

pape de Tissot. Mais la soupape de Tissot elle-même présente bien des inconvénients : ou bien le sujet ne respire que par la bouche, ou bien il faut employer le système compliqué et peu agréable qui permet la respiration nasale par l'introduction d'un tube dans chaque narine. Nous avons pensé que le plus simple serait de nous servir du masque de l'appareil de Tissot contre les gaz toxiques, tel que nous l'avons tous employé, ou vu employer au front. L'expérience de la guerre a prouvé que ce masque pouvait être supporté pendant des heures entières sans gêne appréciable, non pas seulement par des hommes immobiles, mais par des agents de liaison ou par des brancardiers portant des blessés.

Nous n'avons eu qu'à nous louer de cet appareil, après avoir fait faire cependant une légère modification au modèle de l'armée, qui présente un étranglement regrettable sur le tube d'arrivée d'air. Dans le modèle que nous utilisons, aucun tube n'a un diamètre inférieur à 20 millimètres.

Lorsque le masque est *bien posé*, le sujet peut activer sa ventilation pulmonaire jusqu'à 100 litres par minute, sans que le masque fuie à l'expiration. Nous avons pu faire faire à notre sujet, muni de ce masque, les exercices les plus violents, tels que monter à la corde lisse, sans qu'il se trouvât gêné dans sa respiration.

Sur le tube d'expiration, nous fixons un gros tuyau de caoutchouc, qui passe par-dessus la tête du sujet à la façon du cimier d'un casque, et qui aboutit à un vase de 3 litres environ, hermétiquement bouché. Ce vase sert de mélangeur ; c'est là, au cours de l'expérience, que nous faisons les prises d'air à analyser. L'air expiré sort de ce flacon pour passer immédiatement dans un spiro-

mètre de Verdin, construit sur le principe des compteurs à gaz. Ce spiromètre porte un cadran, où à tout instant on peut lire le total de l'air expiré ; un signal électrique nous permet d'inscrire chaque litre sur un cylindre de Marey, où, d'autre part, s'inscrit le temps. Nous n'avons de la sorte aucunement à nous occuper, durant tout le temps de l'expérience, de la lecture du spiromètre.

Tout cet ensemble paraît à la description un peu compliqué. En réalité, il est fort simple, ce qui ne veut pas dire qu'il est parfait. Le gros reproche qu'on peut lui faire est la gêne apportée à l'expiration par l'ensemble du masque, du mélangeur, du spiromètre et de la tuyauterie. Cette gêne est réelle ; nous avons calculé expérimentalement la grandeur de l'obstacle opposé à l'expiration : il est de 2 à 3 centimètres d'eau, soit 1,5 à 2 millimètres de mercure. C'est faible, cela est certain, mais il est non moins certain que, si cet obstacle est sans importance pour un travail de quelques minutes, il doit avoir une influence à la fin d'une heure de marche. Il est probable que la résistance de tout l'appareil de Tissot contre les gaz était supérieure à 3 centimètres d'eau, mais là, il s'agissait d'un obstacle à l'inspiration, et c'est une loi physiologique bien connue qu'un obstacle qui gêne peu l'inspiration rend l'expiration impossible.

Cette contre-pression de 2 centimètres d'eau est due en grande partie au spiromètre ; si on le supprime, l'obstacle n'est plus que de quelques millimètres d'eau ; malheureusement le spiromètre est indispensable, et le modèle de Verdin nous a semblé être celui qui donnait les résultats les plus fidèles et l'obstacle le moins considérable. Le grand spiromètre de Tissot eût été préférable, l'obstacle apporté à la respiration est presque nul quand

l'appareil est bien réglé ; il a l'inconvénient de ne pas contenir plus de 100 litres, et 100 litres, c'est la ventilation pulmonaire de 5 minutes sur un terrain incliné à 5 %. Nous avons donc dû renoncer à l'employer, mais il nous a été d'une très grande utilité pour étalonner le spiromètre de Verdin. L'erreur de cet appareil est d'environ 1 %, en admettant l'exactitude absolue du Tissot ; c'est donc une erreur négligeable et dans la pratique, nous nous servons des chiffres du Verdin sans correction aucune.

Tel est donc l'ensemble de notre installation : l'homme marche et nous connaissons minute par minute sa ventilation pulmonaire. Pour connaître les échanges, nous prenons dans le vase mélangeur, au moyen d'une petite pompe, en l'espèce un simple énéma, une centaine de centimètres cubes d'air que nous envoyons dans un petit ballon en caoutchouc. Nous faisons ces prises à intervalles réguliers : toutes les deux minutes quand l'exercice est court, toutes les cinq minutes quand il est plus long, dans le cas d'une marche d'une heure par exemple, comme c'est le cas dans les expériences qui nous occupent actuellement.

Avant l'expérience, le sujet est pesé, et une prise d'air est faite au repos, le sujet debout, dans le but d'obtenir le métabolisme basal. Il nous a été absolument impossible de surveiller le régime du sujet. Nous avons pris comme seule précaution de faire toujours les expériences à la même heure, autant que possible, vers 15 h. 30, pour avoir un état digestif aussi semblable à lui-même que possible. A partir du commencement du travail, une prise d'air est faite toutes les cinq minutes pendant toute la durée de l'expérience, et une encore cinq

minutes après l'arrêt, le sujet étant resté debout et au repos pendant ce temps.

Sur nos tracés, la courbe de $CO^2$ représente le $CO^2$ total par minute, c'est-à-dire le pourcentage en $CO^2$ de l'air contenu dans le ballon, multiplié par le nombre de litres respirés pendant la minute durant laquelle la prise est faite.

Dans toutes nos expériences, le volume des gaz est donné sans correction de température et de pression ; la température du laboratoire est à peu près constante aux environs de 14 degrés.

L'analyse de l'air des ballons est faite au moyen des appareils de Haldane, ou de Laulanié, appareils que nous n'avons nulle intention de décrire, leur description se trouvant dans tous les traités de physiologie.

Une question très débattue est celle de savoir s'il fallait doser l'acide carbonique et l'oxygène ou seulement l'acide carbonique. Le professeur Waller, dont les travaux sur les échanges pendant le travail font autorité, est très catégorique : le $CO^2$ seul peut être dosé, il est inutile de perdre son temps à doser l'oxygène ; c'est également l'avis actuellement du professeur Lapique. Waller admet qu'un litre de $CO^2$ exhalé correspond à 5 calories ; ce chiffre nous semble faible. Benedict fait tous ses calculs, en partant de l'oxygène ; si nous admettons que les résultats de Benedict sont exacts et si nous en déduisons la valeur en calories de $CO^2$ nous trouvons de 5,5 à 5,9. Le professeur Langlois pense que l'on peut admettre le chiffre de 5,43, en tenant compte du quotient respiratoire du sujet. C'est ce chiffre dont nous nous sommes servis dans nos calculs.

La question a une certaine importance : le chiffre de

$CO^2$ est obtenu en moins d'une minute, alors qu'il faut au moins dix minutes pour obtenir l'oxygène, c'est dire qu'il faut renoncer à pouvoir obtenir le chiffre d'O, de 10 à 15 ballons à moins de disposer d'une batterie d'appareils et d'une équipe d'opérateurs. De plus, l'oxygène est difficile à doser ; une fuite insignifiante, trop fréquente, hélas, avec les robinets les mieux lutés, donne une erreur négligeable au bout de trente secondes qui, au bout d'un quart d'heure, sera considérable, de 1/2 centimètre cube ou plus. Or la lecture doit être faite au 1/10e de centimètre cube près dans le Laulanié, au 1/100e de centimètre cube dans le Haldane, dont la capacité est dix fois moindre. Nous ne croyons pas cependant, et c'est l'avis de notre maître le professeur Langlois et du professeur Richet, nous ne croyons pas qu'on puisse négliger entièrement l'oxygène. Nous avons vu, en effet, que l'on pouvait admettre 5,43 calories comme moyenne de chaleur dégagée dans le corps quand un litre de $CO^2$ est exhalé ; ce chiffre varie néanmoins suivant le quotient respiratoire et, encore qu'on puisse admettre qu'à l'ordinaire le quotient respiratoire subit peu de modifications, il nous paraît cependant utile de contrôler ces variations éventuelles. La moyenne du quotient respiratoire est de 0,80 dans les expériences de Zuntz, avec des variations extrêmes de 0,71 à 0,89.

Nous aurions voulu pouvoir doser l'oxygène, quatre fois au cours d'une expérience : avant, au milieu, à la fin et après. Nous pensons que ces quatre mesures sont suffisantes pour se rendre compte des modifications du quotient respiratoire au cours du travail, et nous regrettons vivement que des difficultés matérielles nous aient empêché de suivre exactement ce plan de travail, et que

nous ayons dû nous contenter de trop rares dosages d'oxygène.

Pour clore ce chapitre, nous devons signaler une objection qui nous a été très récemment faite : le sujet en expérience marchant sur le tapis, en réalité ne marche pas, surtout ne monte pas. Cette objection est une des formes de l'éternel malentendu entre les ingénieurs et les médecins, au sujet du travail statique et du travail dynamique. Pour un ingénieur, le travail c'est le déplacement d'un point à un autre d'un poids, qui est en l'espèce le corps humain, et comme le corps ne bouge pas de place, le travail est nul, comme est nul le travail qui consiste à tenir une haltère à bout de bras.

Mais le physiologiste sait que tenir une haltère à bras tendu est un travail musculaire absolument semblable au travail qui consiste à lever l'haltère de terre jusqu'à la hauteur de l'épaule, et il sait qu'en général, l'organisme fait peu de différence entre un travail statique et un travail dynamique.

Il est possible de réfuter mathématiquement l'objection dont nous venons de parler (1) :

D'après les principes fondamentaux de la mécanique telle qu'elle a été établie depuis Galilée (principe d'inertie), on ne change rien aux accélérations, aux forces d'un système, si on ajoute à l'ensemble de ce système un mouvement de translation à vitesse constante, c'est-à-dire un mouvement correspondant à l'équation : $X = A + b\,t$ dont la vitesse $\frac{dx}{dt} = b$ et dont l'accélération $\gamma$ dérivée seconde, est $= 0$.

(1) Nous devons à notre camarade Faillie, cette explication mathématique, et nous le remercions ici de l'aide qu'il nous a donnée.

Donc on a le droit de supposer le trottoir et un passager, entraîné d'un mouvement de translation uniforme d'ensemble, ayant pour effet d'annuler la vitesse de la partie supérieure du trottoir, sur laquelle marche le sujet ; il en résultera que ce dernier sera alors entraîné, précisément avec cette vitesse de translation uniforme, c'est-à-dire que tout se passe pour lui comme s'il marchait sur un trottoir immobile, en progressant réellement, avec une vitesse uniforme, dirigée dans le sens inverse de celle qui est donnée effectivement au tapis.

Cette vitesse doit être comptée aussi bien suivant sa composante verticale que suivant sa composante horizontale. Il y a donc, en dehors de l'énergie statique dépensée du fait des contractions musculaires, une énergie dynamique mesurée par le travail qui est nécessaire pour élever le sujet d'une hauteur correspondante à cette composante verticale de la vitesse pendant tout le temps de la marche. Ce raisonnement s'applique en mesurant la vitesse du trottoir telle qu'elle est lorsque le sujet est en marche.

Pente du tapis. Le problème est le même que celui de la roue du carrier, lequel exécute un travail mesuré par l'élévation du poids qui monte. On peut aussi raisonner en considérant d'abord un sujet qui ne bouge pas sur un trottoir mobile incliné. Il n'exécute ni ne récupère aucun travail, bien que son centre de gravité change de position et de niveau. Partant de là, on peut considérer tous les mouvements et les efforts qu'il a développés, le travail qu'il va produire, comme rigoureusement identiques à ceux que développerait un deuxième sujet gravissant, à la même vitesse, une pente identique sur un terrain fixe.

Mais la meilleure preuve que l'homme qui utilise notre tapis marche et monte réellement, c'est que, pour une vitesse donnée, ses dépenses augmentent suivant la pente et, pour une pente donnée, suivant la vitesse.

Il faut pourtant savoir que si l'homme marche et monte réellement, son travail au début n'est pas exactement le même que celui qu'il fournirait sur une route, marchant à une même vitesse et avec une même pente. C'est que, au début du moins, d'autres facteurs entrent en jeu : l'homme est obligé de chercher son équilibre ; il ne trouve plus sous ses pieds le sol ferme qu'il est accoutumé de trouver ; de là, une dépense supplémentaire ; mais, de même qu'un bicycliste dépense beaucoup plus lorsqu'il apprend à monter, et voit sa dépense énergique diminuer au fur et à mesure qu'il s'entraîne, et que son équilibre devient instinctif, de même l'homme qui marche sur le tapis verra ses dépenses diminuer à mesure que cet exercice lui deviendra familier.

Le professeur Waller a mesuré la production de $CO^2$ chez un même sujet d'abord marchant sur la route, ensuite sur le tapis, et a constaté, comme il fallait s'y attendre, que le prix de revient du kilomètre était plus élevé dans ce dernier cas.

Une dernière objection, enfin nous a été faite : l'homme ne se déplaçant pas, n'a pas à vaincre la résistance du vent, et, de ce fait, son travail se trouve diminué par rapport à l'homme qui marche réellement sur une route. La résistance de l'air à la vitesse d'un homme au pas est pratiquement négligeable. Bourlet a calculé que cette résistance est donnée par la formule : $R. = SV^2K$. S est la surface du corps exprimée en mètres carrés ; elle est environ de 0 mq 5. V. est la vitesse en mètres par

seconde, et K est un coefficient de résistance, qui est environ de 0,079 jusqu'à la vitesse de 42 mètres par seconde. Dans notre cas, R sera égal à :

$$R = 0,5 \times (1,30)^2 \times 0,079 = 0,066 \text{ kg.}$$

⁂

Dans cette série d'expériences, nous avons cherché à déterminer les variations des échanges pendant la marche, à une vitesse uniforme de 80 mètres par minute, mais avec des pentes variables : d'abord en palier, ensuite à 5 centimètres par mètre, soit 5 %, puis 10 %, puis 15 % ; enfin nous avons modifié la pente en cours d'exercice.

Nous donnons ici le protocole détaillé d'une expérience, les autres ont été faites exactement de la même façon.

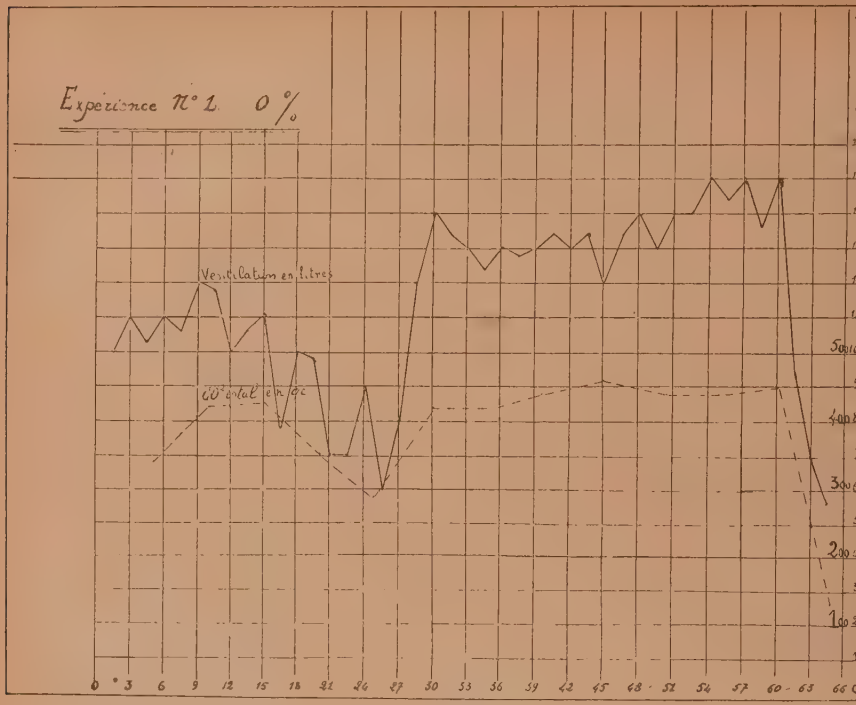
Nous avons adopté l'unité très pratique du mètre-kilogramme, qui, ainsi que nous l'avons déjà expliqué, correspond à la chaleur dépensée pour transporter 1 kilogramme de 1 mètre. Cette unité se calcule en divisant le nombre de calories émis en une minute par (la distance parcourue en une minute × le poids de l'individu).

Le mètre-kilogramme est une unité très commode qui permet de comparer les résultats de différents auteurs, sans tenir compte du poids des sujets, mais il faut tenir compte de la vitesse et de la pente.

EXPÉRIENCE N° 1

*Nom du sujet :* SCELLOS (tenue de sport, sujet entraîné).
*Poids :* 53 kg. 100.
*Heure :* 15 h. 30.
*Température :* 14°.
*Vitesse :* 80 mètres à la minute (4 km. 8 à l'heure).
*Pente :* 0 %.
*Durée de l'expérience :* 60 minutes. Après la fin de l'expé-

Exp. nº 1. — Ventilation et échanges. Marche en terrain horizontal. Vitesse, 80 m. à la minute.




Exp. nº 3. — Ventilation et échanges. Marche en terrain incliné à 10 0/0. Vitesse, 80 m. à la minute.

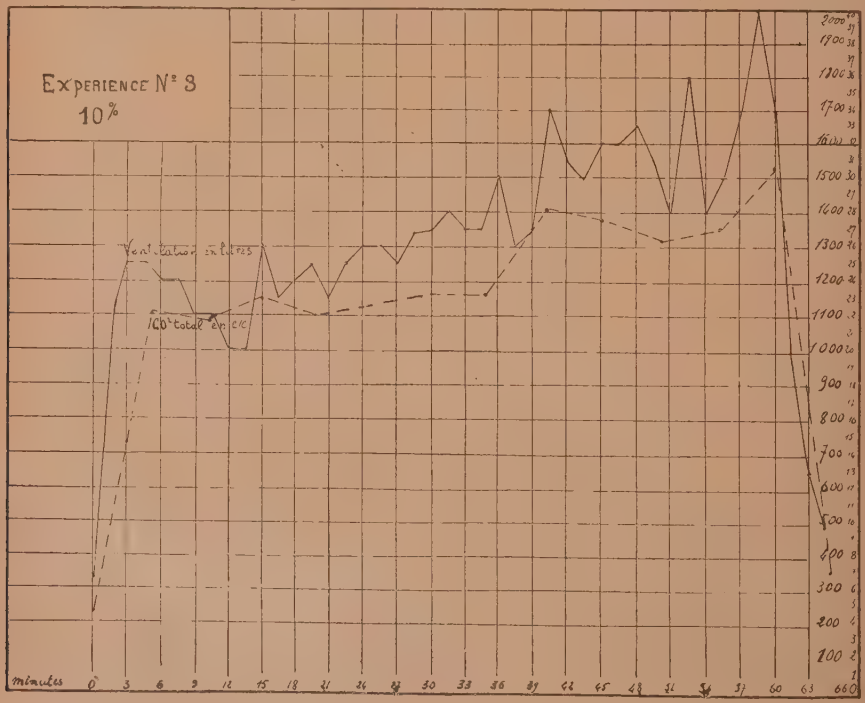


TABLEAU A

| TEMPS EN MINUTES | VENTILATION EN LITRES PAR MINUTE | CO² TOTAL EN C. C. PAR MINUTE | CHALEUR TOTALE EN GRANDES CALORIES par minute | | Chaleur dépensée pendant le travail au-dessus du chiffre de calories au repos | TEMPS EN MINUTES | VENTILATION EN LITRES PAR MINUTE | CO² TOTAL EN C. C. PAR MINUTE | CHALEUR TOTALE EN GRANDES CALORIES par minute | | Chaleur dépensée pendant le travail au-dessus du chiffre de calories au repos | TEMPS EN MINUTES | VENTILATION EN LITRES PAR MINUTE | CO² TOTAL EN C. C. PAR MINUTE | CHALEUR TOTALE EN GRANDES CALORIES par minute | | Chaleur dépensée pendant le travail au-dessus du chiffre de calories au repos |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | en grandes calories par minute | en petites calories par mètre-kilogramme | | | | | en grandes calories par minute | en petites calories par mètre-kilogramme | | | | | en grandes calories par minute | en petites calories par mètre-kilogramme | |
| *a* | *b* | *c* | *d* | *e* | *f* | *a* | *b* | *c* | *d* | *e* | *f* | *a* | *b* | *c* | *d* | *e* | *f* |
| Repos | 5 | 115 | 624 | | | 22 | 6 | | | | | 45 | 12 | 456 | 2,49 | 1,86 | 0,440 |
| | | | | | | 23 | 7 | | | | | 46 | 12 | | | | |
| 1 | 10 | | | | | 24 | 9 | | | | | 47 | 13 | | | | |
| 2 | 40 | | | | | 25 | 7 | 280 | 1,13 | 0,50 | 0,112 | 48 | 14 | | | | |
| 3 | 11 | | | | | 26 | 5 | | | | | 49 | 12 | | | | |
| 4 | 12 | | | | | 27 | 8 | | | | | 50 | 13 | 442 | 2,40 | 1,78 | 0,420 |
| 5 | 10 | 330 | 1,78 | 1,16 | 0,274 | 28 | 12 | | | | | 51 | 14 | | | | |
| 6 | 11 | | | | | 29 | 12 | | | | | 52 | 12 | | | | |
| 7 | 10 | | | | | 30 | 12 | 420 | 2,28 | 1,65 | 0,390 | 53 | 14 | | | | |
| 8 | 10 | | | | | 31 | 14 | | | | | 54 | 15 | | | | |
| 9 | 12 | | | | | 32 | 11 | | | | | 55 | 14 | 448 | 2,43 | 1,81 | 0,429 |
| 10 | 10 | 410 | 2,22 | 1,60 | 0,380 | 33 | 13 | | | | | 56 | 15 | | | | |
| 11 | 13 | | | | | 34 | 13 | | | | | 57 | 14 | | | | |
| 12 | 10 | | | | | 35 | 12 | 420 | 2,28 | 1,65 | 0,390 | 58 | 12 | | | | |
| 13 | 13 | | | | | 36 | 13 | | | | | 59 | 14 | | | | |
| 14 | 9 | | | | | 37 | 13 | | | | | 60 | 15 | 450 | 2,44 | 1,82 | 0,429 |
| 15 | 11 | 429 | 2,43 | 1,80 | 0,406 | 38 | 12 | | | | | 61 | 10 | | | | |
| 16 | 11 | | | | | 39 | 13 | | | | | 62 | 9 | | | | |
| 17 | 6 | | | | | 40 | 13 | 442 | 2,4 | 1,77 | 0,420 | 63 | 7 | | | | |
| 19 | 10 | | | | | 41 | 14 | | | | | 64 | 6 | | | | |
| 18 | 11 | | | | | 42 | 13 | | | | | 65 | 5 | 115 | 624 | | |
| 20 | 9 | 351 | 1,90 | 1,28 | 0,302 | 43 | 13 | | | | | | | | | | |
| 21 | 7 | | | | | 44 | 13 | | | | | | | | | | |

rience, le sujet reste debout sur le tapis sans quitter le masque pendant cinq minutes, pour l'étude du retour au calme.

EXPÉRIENCE N° 2

Même sujet. — Même tenue.

*Poids :* 53 kg. 120.

*Heure :* 15 h. 18.

*Température :* 13°.

*Vitesse :* 80 m. à la minute.

*Pente :* 5 %. Le sujet s'élève de 4 mètres par minute, soit 240 mètres à l'heure.

*Durée d'expérience :* 60 minutes, en marche, plus 5 minutes au repos debout.

EXPÉRIENCE N° 3

Même sujet. — Même tenue.

*Poids (avant) :* 53 kg. 300. — *Après :* 53 kg. 080.

*Heure :* 16 h. 01.

*Température :* 14°.

*Vitesse :* 80 m. à la minute.

*Pente :* 10 %. Le sujet s'élève de 8 mètres par minute, soit 480 mètres à l'heure.

*Durée d'expérience :* 60 minutes en marche, plus 5 minutes au repos debout.

EXPÉRIENCE N° 4

Même sujet. — Même tenue.

*Poids (avant) :* 53 kg. 070. — *Après :* 52 kg. 800.

*Heure :* 15 h. 25.

*Température :* 14°.

*Vitesse :* 80 m. à la minute.

*Pente :* 15 % pendant 35 minutes ; à ce moment le sujet se déclare trop fatigué, on remet immédiatement le tapis horizontal, sans interrompre l'expérience, sans changer la vitesse, et le sujet marche encore dix minutes en palier. Il s'est élevé de 12 mètres par minute, soit 420 mètres en 35 minutes.

*Durée de l'expérience :* 45 minutes en marche, plus 5 minutes au repos, debout.

EXPÉRIENCE N° 5

Même sujet. — Même tenue.

*Poids :* 53 kg. 300.

*Heure :* 16 h. 05.

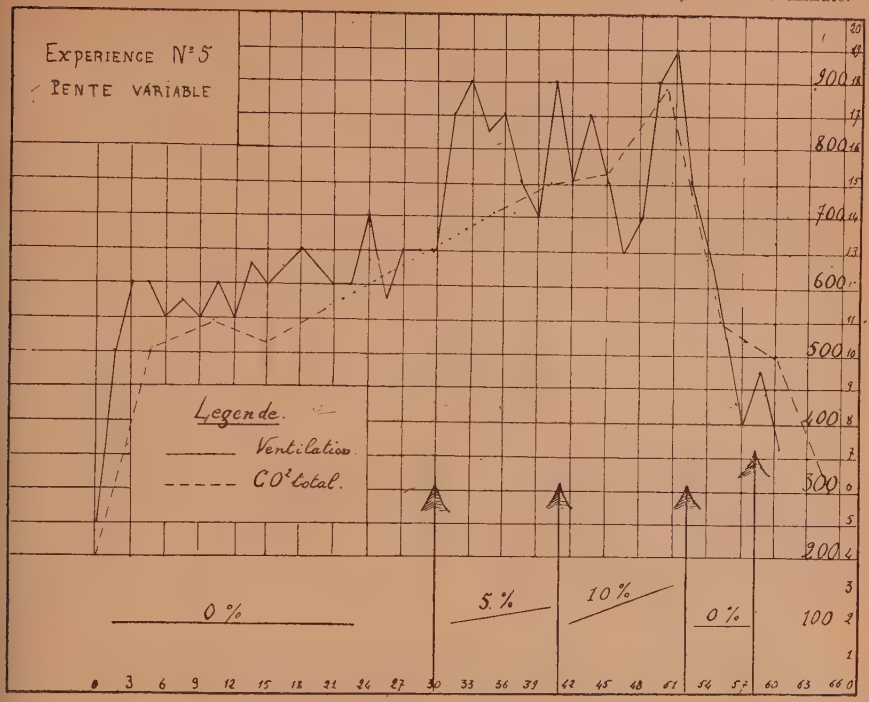
*Température :* 14°.

*Vitesse :* 80 m. à la minute.

*Pente :* 0 %, de 0 à 30 minutes ; 5 %, de 30 à 40 m. ; 10 %, de 40 à 50 m. ; 0 %, de 50 à 60 m.

*Durée de l'expérience :* 60 minutes en marche, plus 5 minutes au repos debout.

Exp. n° 5. — Ventilation et échanges. Marche avec pente variable. Vitesse, 80 m. à la minute.




## TABLEAU B

| | Exp. n° II | | | Exp. n° III | | | Exp. n° IV | | | Exp. n° V | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TEMPS EN MINUTES | VENTILATION EN LITRES par minute | $CO^2$ TOTAL EN C. C. par minute | PETITE CALORIE par mètre-kilogramme | VENTILATION EN LITRES par minute | $CO^2$ TOTAL EN C.C. par minute | PETITE CALORIE par mètre-kilogramme | VENTILATION EN LITRES par minute | $CO^2$ TOTAL EN C.C. par minute | PETITE CALORIE par mètre-kilogramme | VENTILATION EN LITRES par minute | $CO^2$ TOTAL EN C.C. par minute | PETITE CALORIE par mètre-kilogramme |
| 0 | 6 | 198 | | 6.7 | 230 | | 6 | 162 | | 5.5 | 200 | |
| 5 | 19 | 818 | 0,798 | 24 | 1,104 | 1,119 | 23 | 1,104 | 1,207 | 12 | 510 | 0,400 |
| 10 | 19 | 895 | 0,894 | 23 | 1,081 | 1,092 | 23 | 1,104 | 1,207 | 13 | 590 | 0,542 |
| 15 | 16 | 759 | 0,709 | 26 | 1,146 | 1,173 | 23 | 1,071 | 1,110 | 12 | 515 | 0,407 |
| 20 | 18 | 864 | 0,853 | 26 | 1,098 | 1,112 | 25 | 1,150 | 1,218 | 13 | 570 | 0,512 |
| 25 | 16 | 848 | 0,833 | 25 | | | 25 | 1,150 | 1,218 | 11 | | |
| 30 | 21 | 888 | 0,883 | 27 | 1,161 | 1,192 | 26 | 1,144 | 1,216 | 13 | | |
| 35 | 18 | | | 27 | 1,161 | 1,192 | 27 | 1,188 | 1,314 | 16 | 705 | 0,648 |
| 40 | 18 | 740 | 0,745 | 32 | 1,408 | 1,509 | 15 | 585 | 0,539 | 16 | 750 | 0,708 |
| 45 | 16 | 752 | 0,704 | 32 | 1,376 | 1,468 | 14 | 560 | 0,507 | 15 | 765 | 0,725 |
| 50 | 18 | 846 | 0,833 | 30 | 1,320 | 1,400 | 7 | 418 | | 18 | 885 | 0,890 |
| 55 | 18 | 846 | 0,833 | 31 | 1,364 | 1,460 | | | | 11 | 550 | 0,468 |
| 60 | 18 | 828 | 0,807 | 34 | 1,530 | 1,660 | | | | 10 | 500 | 0,395 |
| 65 | 6 | 222 | | 9 | 360 | | | | | 7,5 | 300 | |

*Les calories par mètres-kilogrammes sont calculées sur le nombre de calories au-dessus du chiffre de calories au repos ; elles sont exprimées en petites calories.*

TABLEAU C

| TEMPS EN MINUTES | VENTILATION EN LITRES par minute. | $CO^2$ TOTAL EN C.C. par minute | PETITE CALORIE par mètre-kilogramme | TEMPS EN MINUTES | VENTILATION EN LITRES par minute | $CO^2$ TOTAL EN C.C. par minute | PETITE CALORIE en mètre-kilogramme |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 6,2 | 198 | | 14 | 13 | 559 | 0,464 |
| 2 | 14 | 616 | 0,535 | 16 | 13 | 546 | 0,446 |
| 4 | 12 | 516 | 0,407 | 18 | 13 | 559 | 0,464 |
| 6 | 12 | 516 | 0,407 | 20 | 12,5 | 512 | 0,401 |
| 8 | 14 | 602 | 0,517 | 22 | 9,5 | 351 | |
| 10 | 14 | 574 | 0,481 | 24 | 7 | 210 | |
| 12 | 12 | 516 | 0,407 | | | | |

EXPÉRIENCE N° 6

Même sujet. — Même tenue.

*Poids (avant) :* 51 kg. 390. — *Après :* 51 kg. 240.

*Heure :* 16 h. 05.

*Température :* 14°.

*Vitesse :* 80 m. à la minute.

*Pente :* 0 %.

*Durée d'expérience :* 20 minutes en marche, plus 5 minutes au repos debout.

L'étude des graphiques montre que, dès la cinquième minute, la dépense de $CO^2$ a atteint son niveau moyen.

Il se passe à ce moment un phénomène que nous avons retrouvé dans toutes nos courbes : jusqu'à la 10e ou la 15e minute la courbe s'élève ; vers la 15e ou la 20e, elle s'abaisse fortement, descend jusqu'au chiffre de la 5e minute, parfois même au-dessous ; ensuite elle remonte et se maintient en plateau si le travail est normal, ou au contraire augmente en raison de la fatigue, si le travail est violent.

Les différences constatées ne sont pas très considéra-

bles, et nous aurions pu croire à une erreur si nous ne les avions rencontrées dans presque toutes nos courbes.

Il ne peut pas être question d'effort de « démarrage ». Celui-ci a lieu dans les 2 premières minutes et on peut le constater facilement par l'étude des échanges des toutes premières minutes ou par l'étude de la pression artérielle. On voit alors que l'homme qui commence à marcher fait un effort violent qui dure de 30 secondes à 2 ou 3 minutes au maximum.

Ce phénomène a déjà été signalé sous le nom de « second souffle des coureurs » (Lagrange), de « second wind » par les Anglais. Nous ne connaissons qu'un travail sur le « second wind », celui de Pembrocq and Cooke.

Le second vent est caractérisé par une diminution dans la ventilation avec une disparition des premiers effets de l'essoufflement. On serait porté à attribuer cette diminution à une modification de l'excitabilité des centres bulbaires respiratoires. Mais l'examen des échanges montre que cette diminution dans la ventilation coïncide avec une diminution correspondante des échanges respiratoires.

Si, d'autre part, on remarque que le second souffle est surtout marqué quand le sujet exécute un travail pour lequel il n'est pas entraîné, il semble plus logique d'admettre que le sujet, au cours de la marche ou de l'effort, améliore son rendement par une meilleure adaptation de ses muscles et surtout par un meilleur jeu de ses antagonistes.

Les auteurs anglais signalent l'apparition, au moment de l'établissement du second souffle, de la sudation. Ils paraissent établir un rapport plus ou moins étroit entre

les deux phénomènes. En fait, il est possible que l'apparition de la sueur soit provoquée par la diminution de l'évaporation pulmonaire, consécutive à la diminution de la ventilation.

En ce qui concerne $CO^2$, non pas $CO^2$ total, mais la teneur en $CO^2$ de chaque litre exhalé, chez un sujet entraîné à l'exercice qu'il exécute, si cet exercice est d'intensité normale, le pourcentage en $CO^2$ est à peu près fixe, il varie par exemple de 3,9 à 4,1 %, et les variations de $CO^2$ total, sont dues, non pas à des variations du pourcentage, mais à des variations de la ventilation.

Il n'en est plus ainsi si le sujet, même entraîné aux sports en général, exécute un travail nouveau pour lui ; alors non seulement la ventilation varie, mais la teneur en $CO^2$ passe, par exemple, de 3,5 à 4,5 % en très peu de temps. Si le travail est un travail violent, même chez un sujet entraîné, le pourcentage en $CO^2$ augmente au fur et à mesure que la fatigue se fait sentir, et en même temps qu'augmente la ventilation.

On voit que la règle posée par Haldane de la constance, de la tension de $CO^2$ dans l'air alvéolaire, se trouve vérifiée par nos expériences, pour un travail régulier et normal ; mais elle subit de graves atteintes quand le travail cesse d'être régulier et entre presque dans le domaine pathologique.

## CONCLUSIONS

1° L'établissement d'un tapis roulant avec vitesse et pente variables permet de poursuivre chez l'homme, avec une exactitude impossible à réaliser autrement, l'étude des modifications physiologiques, et en particulier des échanges respiratoires, pendant une marche aussi longue qu'on le désire, soit en palier, soit en pente ;

2° L'étude des échanges respiratoires montre qu'en palier, pour une vitesse moyenne de 80 mètres à la minute, l'homme dépense environ 0,420 petite calorie par kilo d'individu et par mètre parcouru, en plus du métabolisme basal pris le sujet debout. Pour une même vitesse, ce chiffre augmente quand le sujet marche suivant un plan incliné ; la dépense passe de :

0,420 petite calorie par mètre-kilogramme en palier, à
0,800 — — pour une pente de 5 % ;
1,100 — — pour une pente de 10 %.

3° L'étude des courbes montre que, chez un sujet entraîné, les modifications des échanges suivent brusquement la variation des efforts ; qu'il s'agisse du départ ou d'une modification de la pente en cours de marche, le régime s'établit en moins de cinq minutes. Après l'arrêt, le retour au calme a lieu en cinq minutes ;

4° Le second souffle des coureurs, que les Anglais appellent aussi « second wind », doit être attribué à une diminution dans l'intensité des échanges pour un travail constant, diminution qui résulte d'une meilleure adaptation du sujet au travail.

# BIBLIOGRAPHIE

Pour tout ce qui concerne la bibliographie de Marey, de son école et de ses prédécesseurs, voir la bibliographie remarquable de l'article *Locomotion* du Dictionnaire de Physiologie de Ch. Richet.


*Achard, Desbouis, Leblanc et Binet :* Etude des échanges respiratoires dans les intoxications par les gaz de combat. Archives de Méd. Expér., 1919, p. 468.

*Amar :* Le moteur humain, Paris, 1914.

*Atwater (W.-O.) et F.-G. Benedict :* A respiration calorimeter with appliances of the direct determination of oxygen. 1905. Carnegie Institution of Washington.

*Benedict (Francis-G.) :* The influence of inanition on metabolism. 1907. Carn. Inst.

*Benedict (Francis-G.) et T.-M. Carpenter :* Respiration calorimeter for studying the respiratory and energy transformations of man. 1910. Carnegie Inst.

*Benedict (Francis-G.) et T.-M. Carpenter :* The metabolism and energy transformation of healthy man during rest. 1910. Carn. Inst.

*Benedict (Francis-G.) et E.-P. Cathcart :* Muscular work : a metabolic study with special reference to the efficiency of the human body as a machine. 1913. Carn. Inst.

*Carpenter et M. Thorne :* A comparition of methods of determining the respiratory exchanges of man. 1915. Carnegie Inst.

*Benedict (Francis-G.) et H. Murschlauser* : Energy transformations during horizontal walking. 1915. Carn. Inst.

*Benedict (Francis-G.) :* A portable respiration apparatus for clinical use. Boston med. and surg. Journ., 11 mai 1918, p. 667.

*Brezina et Kolmer :* Biochem. Zeitschr., 1912, 28, p. 132.

*Caspari :* Archiv. f. d. ges. Physiol., 1905, 109, p. 473.

*Chauveau :* Comptes-rendu à l'Académie des Sciences, 1899, 129, p. 249.

*Douglas, Haldane, Henderson et Schneider :* Phil. trans. Roy. Soc. Londres, 1913. Ser. B. 203, p. 185.

*Dürig :* Derkschriften d. Math.-Natur. Klasse d. Kaiserl. Akad. d. Wissensch. 1909, 86, p. 267.

*Dürig et Zuntz :* Laboratoire Scientifique International du Mont-Rose ; Travaux de 1903.

*Galeotti :* Reale Academia dei Lincei Rome, 1909, et Archiv. d. Fisiol., 1914, 12, p. 277.

*Gephart et E.-F. Du Bois :* The organisation of a small metabolism Ward. Archiv. of Intern. Med. Mai 1915.

*Grüber :* Zeitsch. f. Physiol., 1891, 28, p. 470.

*Hirn :* Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur. Paris, 1856.

*Katzenstein :* Archiv. f. d. ges. Physiol. 1891, 49, p. 331.

*Langlois (J.-P.)* : Travail dans les milieux chauds et humides. Soc. de biologie.

*Langlois (J.-P.)* : Tapis roulant pour l'étude de la marche et du travail. C. R. A. des Sciences, 6 juin 1921.

*Langlois (J.-P.)* : Sur le second vent des coureurs. C. R. A. des Sciences, 13 juin 1921.

*Lambling (E.) :* Précis de Biochimie. Paris, 1911.

*Lefèvre Jules :* Chaleur animale et Bioénergitique. Paris 1911.

*Loewy (A.), J. Loewy et Zuntz :* Archiv. f. d. ges. Physiol., 1897, 66, p. 477.

*Pembrey et Cooke :* The second wind. Proc. of Physiological Society. 1908. J. of Physiolog, p. XLVI.

*Presse Médicale :* Mouvement médical, mars 1921 : Le métabolisme basal.

*Riche et Soderstrom :* The respiration calorimeter of the Russel Sage Institute. Archiv. of Intern. med., mai 1915, p. 805.

*Sestschenow et Schaternikow :* Le Physiol. Russe. 1900, 2, p. 44.

*Smith :* Phil. Trans. Roy. Soc. Londres, 1859, 149, p. 681.

*Sonden et Tigerstedt :* Skand. Archiv. f. Physiol. 1895, 6, p. 166.

*Weber (E. et W.) :* Mécanique de la locomotion chez l'homme. Traduction Jourdan, 1843.

*Woodbury :* The basal metabolism. Journ. of the Americ. Med. Assoc., 10 avril 1920.

*Zuntz et Schumburg :* Physiologie des Marsches. Berlin, 1901.

*Zuntz et Schumburg :* Archiv. f. d. ges. Physiol. 1896, 63, p. 401.

578-21. — Imp. du Palais, 20, rue Geoffroy-l'Asnier, Paris.